

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงานสองขด

Study of Factors Affecting Wireless Power Transmission Using a Double-Transmitter-Coil

เอกชัย ชัยดี* ภาณุพงศ์ โวหาร และวัตมล แก้วถึง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120

Ekkachai Chaidee* Phanuphong Wohan and Watthamon Kaeothueng

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

99 Moo 10, Saikhao, Phan, Chiangrai, Thailand, 57120

*ผู้รับผิดชอบบทความ: Ekkachai.ch799@gmail.com, Ekkachai@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-5372-3979

บทคัดย่อ

การเพิ่มกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงานหลายขดจำเป็นต้องเข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อการส่งกำลังงาน การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการส่งกำลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด จากผลการวิเคราะห์วงจรสมมูลไฟฟ้าพบว่าพารามิเตอร์ที่มีผล คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า ความต้านทานของโหลด ความเหนี่ยวนำร่วม และความถี่รีโซแนนซ์ ได้ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด ใช้วงจรขับเป็นอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น ออกแบบการทดลองโดยให้ความสำคัญที่ความเหนี่ยวนำร่วม และความถี่รีโซแนนซ์ เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่มีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าพารามิเตอร์อื่น และทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย จากผลการศึกษาพบว่า 1) จำนวนขด ทิศทางการไหลของกระแส และตำแหน่งการจัดวางขดส่งกำลังงาน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำร่วม 2) การเพิ่มขดส่งกำลังงาน 2 ขด ที่ระยะห่าง และตำแหน่งการจัดวางที่เหมาะสม สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้ 3) การปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ตามการเปลี่ยนแปลงของระยะห่าง ตำแหน่งการจัดวางตัวนำ ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาใช้เป็นแนวทางการศึกษาและพัฒนาวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายต่อไป

คำสำคัญ การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย กำลังไฟฟ้าขาออก ขดส่งกำลังงานหลายขด ความเหนี่ยวนำร่วม ความถี่รีโซแนนซ์

Abstract

To increase the power output of multiple wireless power transmission and thus investigate factors affecting the wireless power transmission. The objective of this study was to study and analyze factors affecting wireless power transmission using a double-transmitter-coil. Analyzing an equivalent circuit showed that the affecting parameters are input voltage, load resistance, mutual inductance and resonance frequency. A wireless power transmission circuit driven by a full bridge inverter was designed. The designed experiment was focused on mutual inductance and resonance frequency which were more potentially changeable than other parameters. The results from this study showed that 1) The number of transmitter-coils, the directions of electric current and a proper position of transmitter-coil affected mutual inductance 2) A double-transmitter-coil at an optimal distance position increased the power output and the efficiency of wireless power transmission 3) Adjusting of frequency resonance following the change of distance, position of transmitters increased the power output and the efficiency of wireless power transmission. The findings of this study could be utilized as a guideline for further study and development relating to wireless power transmission.

Keywords: wireless power transmission, power output, double-transmitter coil, mutual inductance, resonance frequency.

1. บทนำ

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้สนามแม่เหล็กความถี่สูงในสถานะรีโซแนนซ์คลื่นระหว่างขดตัวนำด้านส่งและด้านรับ รู้จักครั้งแรกจากการทดลองของนิโคลาร์ เทสลา [1] นิโคลาร์ เทสลา ใช้ขดตัวนำพันบนแกนอากาศต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ทำหน้าที่เป็นขดส่งและรับกำลังงานส่งกำลังงานผ่านตัวกลางอากาศ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้งานหลายด้าน เช่น การประจุแบตเตอรี่ให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็ก รถยนต์ไฟฟ้า งานทางการแพทย์ เป็นต้น

งานวิจัยเกี่ยวกับการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่ผ่านมามีหลายลักษณะ เช่น การหาเทคนิคเพิ่มกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ [2] การขยายระยะทางการส่งกำลังงาน [3] เป็นต้น ในปัจจุบันมีแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีอีกด้านหนึ่ง คือ การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดส่งกำลังงานหลายขดเพื่อเพิ่มฟลักซ์แม่เหล็กด้านส่งกำลังงาน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า [4] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่ง 2 ขด ขดละ 2 ขด ตัวนำ อธิบายการเปลี่ยนแปลงความถี่รีโซแนนซ์เมื่อมีโลหะแทรกระหว่างด้านส่งและรับกำลังงาน [5] ได้วิเคราะห์ผลของปรากฏการณ์ diversity โดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์แบบ Coupled mode theory และการวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้า ซึ่งได้ผลตรงกัน [6] พัฒนาเต้าส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายใช้ขดส่งกำลังงาน 7 ขดวางในแนวนอน ซึ่งไม่คำนึงถึงตำแหน่งการจัดวางตัวนำด้านส่งแต่อย่างใด งานวิจัยที่กล่าวมามีจุดเด่น แนวทางการศึกษาต่างกันอย่าง

การออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงานหลายขดจำเป็นต้องเข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังงาน ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้ศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด สำหรับเป็นแนวทางในการเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออก เนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายพิกัดสูงนั้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ต้องรับภาระทำให้มีโอกาสเสียหายได้และประกอบกับการออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายพิกัดกำลังสูง ขดตัวนำต้องมีความเหนี่ยวนำสูง ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้ขนาดขดตัวนำไม่เหมาะสมแก่การประยุกต์ใช้งานบางอย่าง หรือการเพิ่มความเหนี่ยวนำโดยใช้วัสดุ เช่น แกนเฟอร์ไรต์ ที่มีขายตามท้องตลาด พบว่ามีผลตอบสนองทางความถี่ในย่านที่สูงซึ่งอาจไม่ตรงกับย่านความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นการเพิ่มจำนวนขดส่งกำลังงานจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว

2. วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบและสร้างระบบส่งกำลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่ง 2 ขด

เพื่อศึกษาผลของความเหนี่ยวนำร่วม และความถี่ที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงานไฟฟ้า 2 ขด

3. แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแกนอากาศ

หม้อแปลงไฟฟ้าแกนอากาศ อาศัยหลักการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็กในการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) จึงสามารถส่งแรงดันไฟฟ้าผ่านอากาศจากตัวนำหนึ่งไปยังอีกตัวนำหนึ่ง

3.2 วงจรไฟฟ้าในสถานะรีโซแนนซ์

รูปแบบพื้นฐานของวงจรรีโซแนนซ์ คือ แบบอนุกรมและแบบขนาน ภายในวงจรประกอบไปด้วย ความเหนี่ยวนำ (L) ตัวเก็บประจุ (C) ความต้านทาน (R) วงจรไฟฟ้าจะอยู่ในสถานะรีโซแนนซ์ก็ต่อเมื่อมีความถี่ที่เหมาะสม สามารถทำให้ XL และ XC มีค่าเท่ากัน ซึ่งความถี่นั้นเรียกว่า ความถี่รีโซแนนซ์ สามารถหาได้ตามสมการ ดังนี้

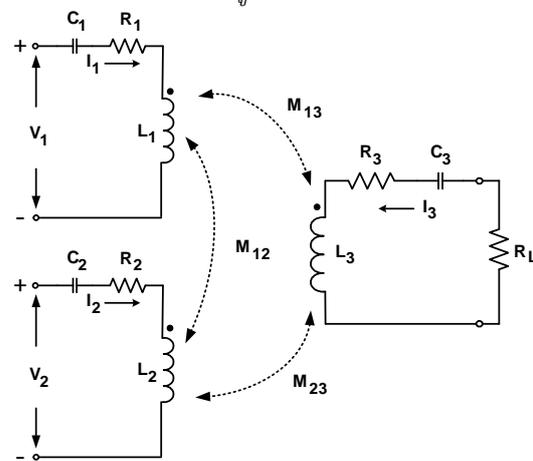
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

3.3 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถใช้ในระดัความถี่ที่มีค่าสูงได้

4. วิธีการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้า



รูปที่ 1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ส่งกำลังงาน 2 ขด

ใช้สมการแรงดันของเคอร์ซอพฟ์ (KVL) หาสมการแรงดันในแต่ละลูปของวงจรในรูปที่ 1 จากนั้นจึงจัดสมการความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน อิมพีแดนซ์ และกระแสในแต่ละลูปวงจร ได้ตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} \\ j\omega M_{12} & Z_2 & j\omega M_{23} \\ j\omega M_{13} & j\omega M_{23} & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ $Z_1 = \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 \right)$, $Z_2 = \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 \right)$, $Z_3 = \left(R_3 + R_L + \frac{1}{j\omega C_3} + j\omega L_3 \right)$ และ M_{12}, M_{13}, M_{23} คือ ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดตัวนำ V_1, V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าขดส่งกำลังงานขดที่ 1 และ 2

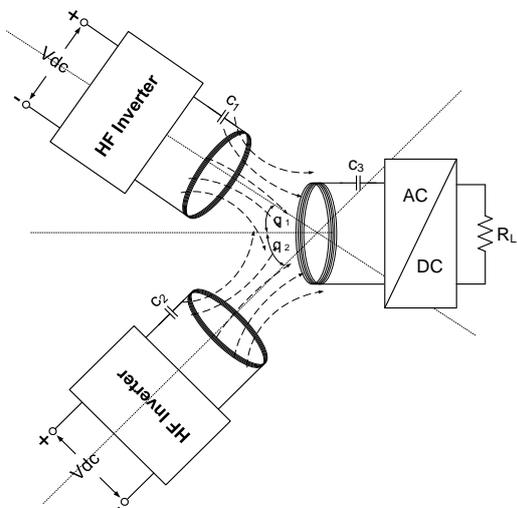
สมการที่ (2) ใช้หากระแสในแต่ละลูป สำหรับนำไปหากำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ ได้ดังสมการที่ (3) สอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง [1],[3]

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in1} + P_{in2}} = \frac{I_3^2 R_L}{V_1 I_1 + V_2 I_2} \quad (3)$$

กรณีใช้จำนวนขดส่งกำลังงาน n ขดสามารถวิเคราะห์หาสมการประสิทธิภาพ และกำลังไฟฟ้าขาออกได้ในลักษณะเดียวกัน

4.2 ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

องค์ประกอบของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด แสดงดังรูปที่ 2

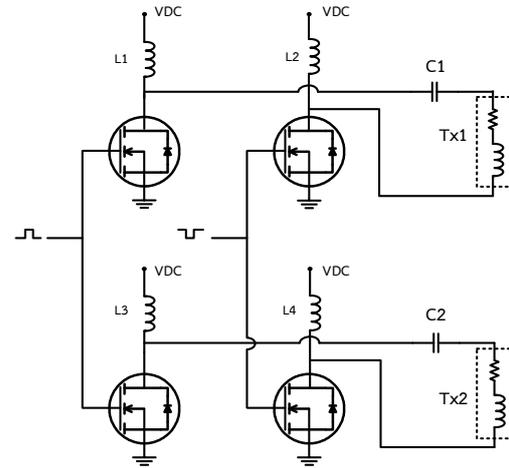


รูปที่ 2 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบ ใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด และขดรับกำลังงาน 1 ขด

ส่วนประกอบหลักประกอบไปด้วย อินเวอร์เตอร์ ขดตัวนำด้านส่ง และด้านรับกำลังงาน ต่อกันกับคาปาซิเตอร์เพื่อทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์

4.2.1 อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

ใช้สำหรับจ่ายกำลังงานให้กับขดส่งกำลังงาน ทำงานย่านความถี่ระดับกิโลเฮิร์ต พัฒนามาจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุก-พูล แสดงดังรูปที่ 3



ก) ไดโอดแกรมวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง



ข) วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงรูปที่ 3 ไดโอดแกรมและวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

4.2.2 พารามิเตอร์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

ขดตัวนำด้านส่ง และด้านรับกำลังงาน ทำมาจากตัวนำทองแดงเบอร์ 18 AWG พันบนแกนอากาศ เส้นผ่านศูนย์กลาง 26 cm จำนวน 200 รอบ วัดค่าพารามิเตอร์โดยใช้เครื่องมือวัด R-L-C ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ได้ค่าความเหนี่ยวนำ 0.038 H และค่าความต้านทาน 4.75 Ω ใช้ค่าคาปาซิเตอร์ 4.7 nF ใช้ความถี่รีโซแนนซ์ 19.7 kHz ลักษณะขดตัวนำแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะขดตัวนำด้านส่งและรับกำลังงาน

ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเหนี่ยวนำ คาปาซิแตนซ์ และความถี่เรโซแนนซ์ แสดงดังสมการที่ (4) ดังนี้

$$C = \frac{1}{(4\pi^2 \times f_r \times L)} \quad (4)$$

4.3 ออกแบบการทดลอง

พิจารณาผลการวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้า พบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_1) ความต้านทานของโหลด (R_L) ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และความเหนี่ยวนำรวม (M)

โดยที่ความเหนี่ยวนำรวมและความถี่เรโซแนนซ์ เป็นพารามิเตอร์ที่มีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าพารามิเตอร์ตัวอื่น จึงได้ออกแบบการทดลองเพื่อสังเกตผลของพารามิเตอร์ดังกล่าว ตามสมมุติฐานดังนี้

4.3.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเหนี่ยวนำรวม

จากสมการพื้นฐานของความเหนี่ยวนำรวมระหว่างตัวนำ 2 ขด แสดงในสมการที่ (5)

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (5)$$

เมื่อ L_1, L_2 คือ ความเหนี่ยวนำของขดตัวนำแต่ละขด

k คือ Coefficient of Coupling เป็นอัตราส่วนของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดตัวนำที่ส่งมาจากด้านขดส่งกำลังงาน [7]

พิจารณาสมการที่ (5) ประกอบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้ความเหนี่ยวนำรวมเปลี่ยนแปลงคือ

1) ระยะห่างระหว่างตัวนำ งานวิจัย [1] ได้แสดงสมการ

k ในฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างตัวนำ

เมื่อ r_1, r_2 คือ รัศมีของขดตัวนำแต่ละขด

d คือ ระยะห่างระหว่างขดตัวนำ

$$k = \frac{1}{\left[1 + 2^{2/3} \left(d / \sqrt{r_1 r_2}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (6)$$

จากสมการ (5) และ (6) จึงกล่าวได้ว่าระยะห่างของขดตัวนำมีผลต่อความเหนี่ยวนำรวม

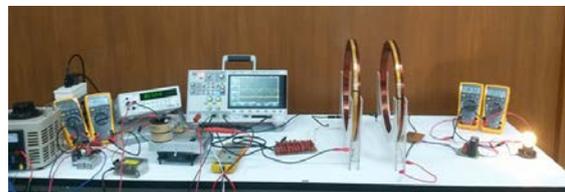
2) การจัดวางตัวนำในแนวเอียงด้านข้าง (Lateral misalignment) งานวิจัย[8] ได้อธิบายผลของความเหนี่ยวนำรวมเมื่อตัวนำวางเอียงกันทางด้านข้าง

3) การจัดวางตัวนำในแนวเอียงเชิงมุม (Angular misalignment) งานวิจัย [9] ได้อธิบายผลของความเหนี่ยวนำรวมเมื่อจัดวางตัวนำในแนวเอียงเชิงมุม

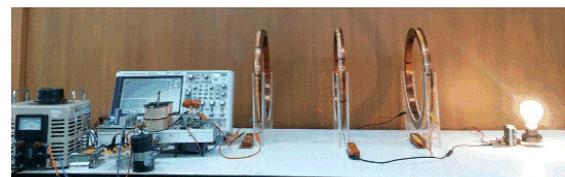
เมื่อพิจารณาการจัดวางตัวนำในกรณีที่ 2) และ 3) ประกอบกับนิยามของ (k) (Coefficient of coupling) พบว่า การจัดวางตัวนำมีผลกับการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำรวม อย่างไรก็ตามปัจจัยทั้ง 3 ข้อ ที่กล่าวมา ใช้กับรูปแบบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย 2 ขดคือ ขดส่งและรับกำลังงาน อย่างละ 1 ขด ตามรูปแบบของ นิโคลาร์ เทสเลอร์ ดังนั้นเพื่อพิจารณาว่าปัจจัยทั้ง 3 ข้อ มีผลกับกรณีใช้ขดส่งกำลังงานมากกว่า 1 ขด หรือไม่ จึงได้ออกแบบการทดลองอ้างอิงตามสมมุติฐานดังกล่าว

4.3.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความถี่เรโซแนนซ์

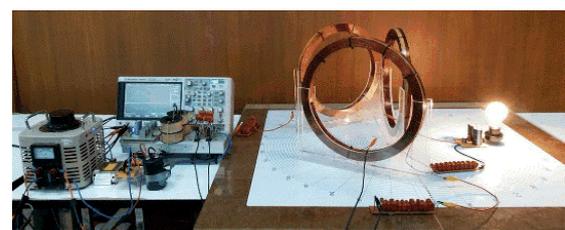
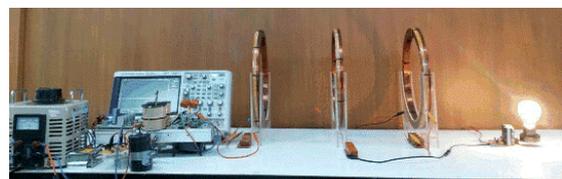
เมื่อความเหนี่ยวนำรวมเปลี่ยนแปลงทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลงตาม ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายจึงเปลี่ยนไปด้วย หรืออาจมองได้ว่าจำเป็นต้องปรับค่าความถี่เพื่อชดเชยผลของการเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำรวมดังกล่าว [10] การทดลองนี้จึงมีลักษณะติดตามความถี่ของวงจรเมื่อระยะห่าง การจัดวาง และมุมของตัวนำเปลี่ยนแปลงไป



ก) ขดส่งกำลังงาน 1 ขด จัดวางในแนวตรง



ข) ขดส่งกำลังกำลังงาน 2 ขด จัดวางในแนวตรง



ค) ขดส่งกำลังงาน 2 ขด จัดวางในแนวเชิงมุมรูปที่ 5 ลักษณะการทดลองและพิกัดการจัดวางตัวนำ

5. ผลการวิจัย

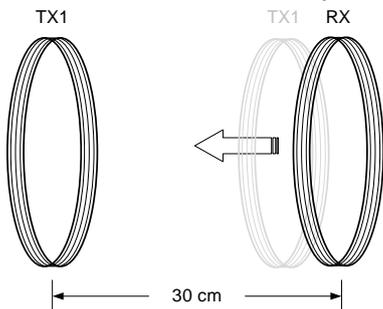
การทดลองทั้งหมดใช้แรงดันกระแสตรงขาเข้า 40 V คงที่ ตลอดการทดลอง ใช้ความถี่ไอโซเนนซ์ 11.9 kHz จ่ายกำลังงานให้กับโหลดตลอดได้ขนาด 60 W ใช้ขดรับกำลังงาน 1 ขด ลักษณะการทดลองและการจัดวางตัวนำแสดงดังรูปที่ 5 ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน คำนวณจากสัญญาณแรงดัน และกระแส ที่วัดได้ในวงจร

5.1 การทดลองที่ 1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบวางตำแหน่งขดตัวนำในแนวตรง

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

5.1.1 การทดลองที่ 1.1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดส่งกำลังงาน 1 ขด

ผลการทดลองใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับกรณีก่อนใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด ในการทดลองใช้ขดส่ง และรับกำลังงาน อย่างละ 1 ขด จัดวางตัวนำในแนวตรง เลื่อนขดส่งกำลังงาน ออกห่างจากขดรับตั้งแต่ 0 – 30 cm แสดงดังรูปที่ 6 ดังนี้

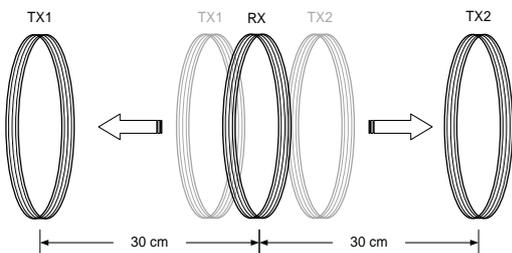


รูปที่ 6 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงาน 1 ขด วางในแนวตรง

5.1.2 การทดลองที่ 1.2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด

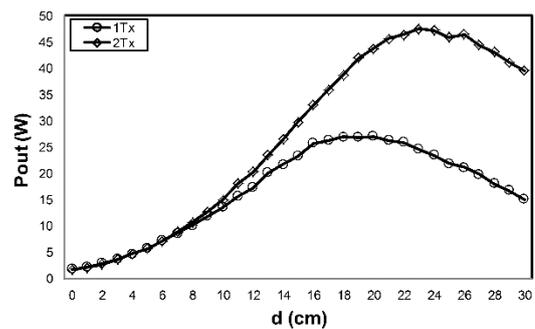
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพกรณีใช้ขดส่งกำลังไฟฟ้า 2 ขด ลักษณะการทดลองและการจัดวางตัวนำแสดงดังรูปที่ 7 ทำการทดลองใน 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 เลื่อนขดส่งกำลังงานออกห่างขดรับกำลังงานเท่าๆ กันครั้งละ 1 cm ระยะ 0 – 30 cm ได้ลักษณะกราฟกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับกรณีใช้ขดส่งกำลังงาน 1 ขด แสดงดังรูปที่ 8 และ 9 ดังนี้

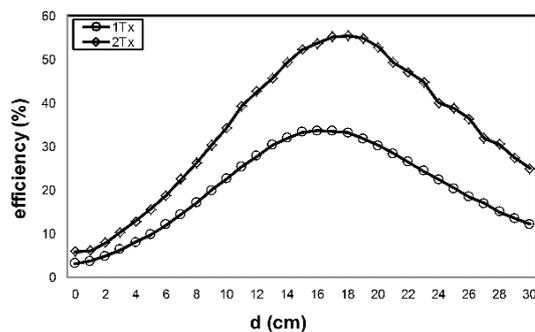


รูปที่ 7 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด วางในแนวตรง

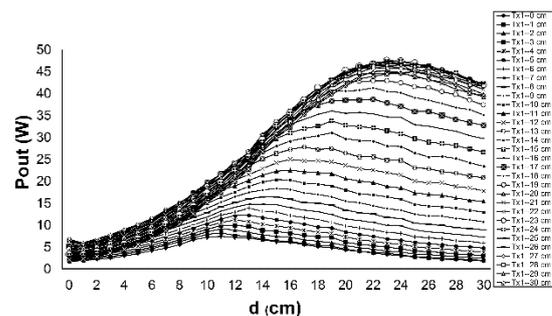
จากรูปที่ 8 และ 9 พบว่า การใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด ทำให้ค่ากำลังงานไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้น 62% ที่ระยะ 20 cm ในขณะที่ประสิทธิภาพเพิ่ม 59% ที่ระยะ 16 cm ซึ่งพิจารณาจากจุดที่ดีที่สุดจากการใช้ขดส่ง 1 ขด กรณีที่ 2 กำหนดให้ขดส่งกำลังงาน Tx1 คงที่ จากนั้นทำการเลื่อนขดส่งกำลังงาน Tx2 ออกห่างจากขดรับกำลังงาน Rx ครั้งละ 1 cm ตั้งแต่ 0 – 30 cm จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเลื่อนขดส่งกำลังงาน Tx1 ออกห่างขดรับกำลังงาน Rx ครั้งละ 1 cm ได้ลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพรูปที่ 10 และ 11



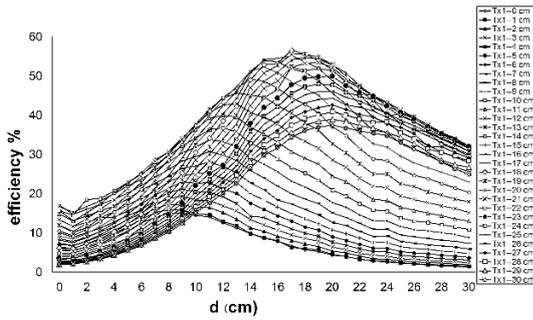
รูปที่ 8 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อใช้ขดส่งกำลังงาน 1 ขด และ 2 ขด



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพ เมื่อใช้ขดส่งกำลังงาน 1 และ 2 ขด

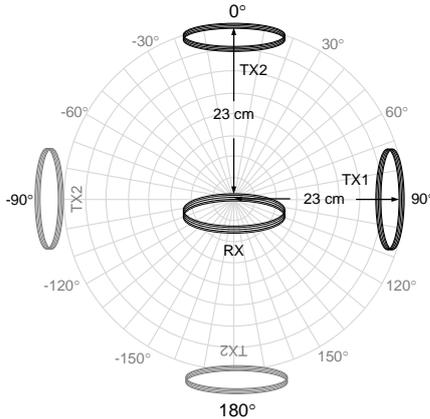


รูปที่ 10 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อใช้ขดส่ง 2 ขด



รูปที่ 11 ประสิทธิภาพเมื่อใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด

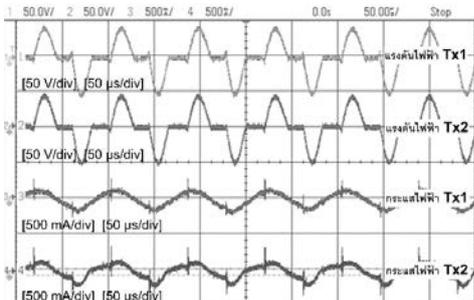
จากรูปที่ 10 และ 11 พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด 47.47 W เมื่อขด Tx1 และ Tx2 ห่างจากขด Rx ด้านละ 23 cm ในขณะที่ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุด 56.68% เมื่อขด Tx1 ห่างจากขด Rx 18 cm และ Tx2 ห่างจากขด Rx 17 cm ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองกรณีที่ 1



รูปที่ 12 โดอะแกรมการทดลองกรณีใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด วางในแนวเชิงมุม

5.2 การทดลองที่ 2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด วางในแนวเชิงมุม

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเหนี่ยวนำร่วม (M_{12}, M_{13}, M_{23}) ตำแหน่งพิกัดการจัดวางตัวนำแสดงดังรูปที่ 12 ตำแหน่งขดส่ง Tx1 คงที่ตำแหน่ง 90° เลื่อนตำแหน่งขด Tx2 ครั้งละ 10° ทดลองซ้ำโดยปรับขดส่ง Tx1 ครั้งละ 10° แบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลองดังนี้

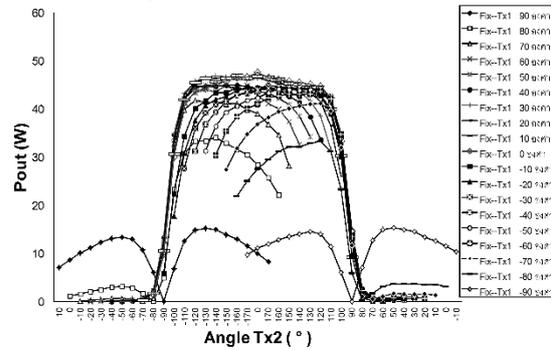


รูปที่ 13 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านขาเข้าขดส่งกำลังงาน Tx1 และ Tx2 การทดลองที่ 2.1

รูปที่ 13 ได้จากการทดสอบที่ระยะห่าง 22 cm เนื่องจากเป็นระยะที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด

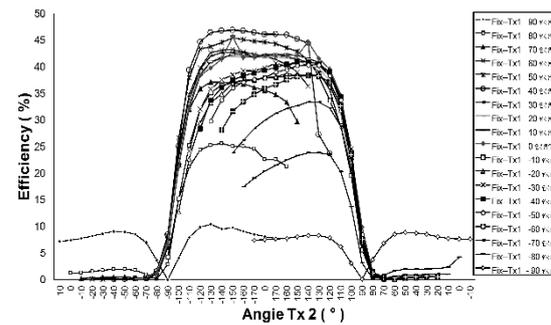
5.2.1 การทดลองที่ 2.1 กำหนดให้ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านขดส่งกำลังงาน Tx1 และ Tx2 ไปในทิศทางเดียวกัน

ทิศทางการไหลของกระแสผ่านขด Tx1 และ Tx2 มีเฟสตรงกันแสดงดังรูปที่ 13 มีลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพเทียบกับมุมของ Tx2 ที่ตำแหน่ง Tx1 ต่างกันแสดงดังรูปที่ 14 และ 15 ดังนี้



รูปที่ 14 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อทิศทางการไหลของกระแสผ่านขด Tx1 และ Tx2 มีทิศทางเดียวกัน

จากรูปที่ 14 พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด 47.59 W ที่ตำแหน่งของ Tx1 ที่มุม 0° และ Tx2 ที่มุม 180°

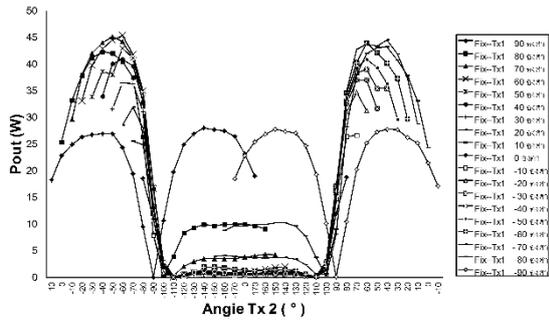


รูปที่ 15 ประสิทธิภาพเมื่อทิศทางการไหลของกระแสผ่านขด Tx1 และ Tx2 มีทิศทางเดียวกัน

พิจารณารูปที่ 15 พบว่าประสิทธิภาพสูงสุด 46.82% เมื่อ Tx1 วางในตำแหน่งมุม 40° และ Tx2 ที่มุม -150°

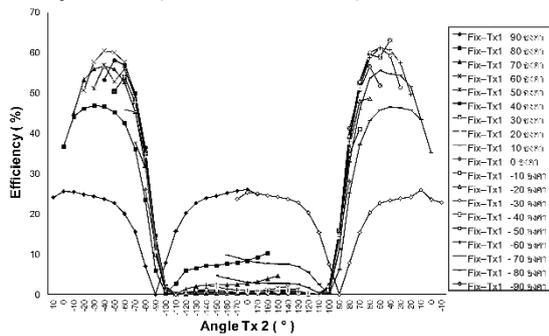
5.2.2 การทดลองที่ 2.2 กำหนดให้ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านขดส่ง กำลังงาน Tx1 และ Tx2 สวนทางเดียวกัน

สลับขั้วของแหล่งจ่ายกระแสตรงที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ที่ขดส่ง Tx1 ทำให้มุมเฟสของกระแสไหลผ่านขดส่งทั้ง 2 ต่างเฟสกัน 180° กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพดังรูปที่ 16 และ 17

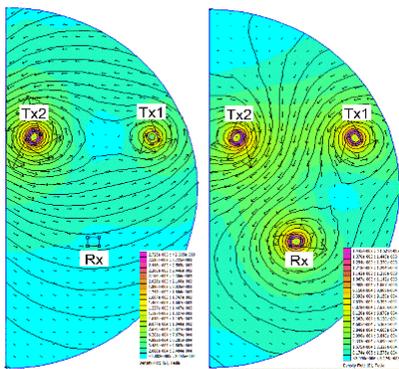


รูปที่ 16 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อทิศทางการไหลของกระแสผ่านขด Tx1 และ Tx2 มีทิศทางสวนกัน

จากรูปที่ 16 พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด 45.34 W เมื่อ Tx1 อยู่ตำแหน่งมุม 60° และ Tx2 ที่มุม -60°



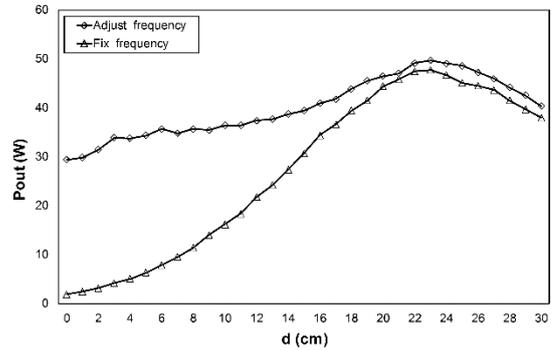
รูปที่ 17 ประสิทธิภาพเมื่อทิศทางการไหลของกระแสผ่านขด Tx1 และ Tx2 มีทิศทางสวนกัน



รูปที่ 18 สนามแม่เหล็ก เมื่อ Tx1 ที่มุม 60° และ Tx2 ที่มุม -60° การทดลองที่ 2.1 (ซ้าย) และ 2.2 (ขวา)

ในขณะที่ประสิทธิภาพในรูปที่ 17 มีค่าสูงสุด 63.08% ที่ตำแหน่งขด Tx1 มุม -40° และ Tx2 ที่มุม 40° ทำการจำลองลักษณะสนามแม่เหล็กกรณีขด Tx1 อยู่ตำแหน่งมุม 60° และ Tx2 ที่มุม -60° เปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ 2.1 และ 2.2 โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) จากผลการจำลองในรูปที่ 18 สอดคล้องกับผลการทดลองทดลองที่ 2.1 และ 2.2 แสดงถึงทิศทางการไหลของกระแส และตำแหน่งการจัดวางตัวนำมีผลต่อการหักล้างหรือเสริมของสนามแม่เหล็ก

5.3 การทดลองที่ 3 การทดลองปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ เพื่อศึกษาผลกระทบทางความถี่ จึงได้ทำการทดลองปรับค่าความถี่ตามระยะห่าง และตำแหน่งการจัดวางตัวนำตามการทดลองที่ 1 และ 2



รูปที่ 19 กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์กรณีใช้ขดส่ง 1 ขดวางในแนวตรงกับขดรับ

พบว่ากรณีใช้ขดส่งกำลังงาน 1 ขด ตามการทดลองที่ 1 ให้กำลังงานไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้น 5 % ที่ระยะ 23 cm แสดงดังรูปที่ 19 ในขณะที่ประสิทธิภาพเพิ่ม 11% ที่ระยะ 18 Cm โดยพิจารณาจากจุดที่ดีที่สุด

จากการทดลองที่ 2 ให้กำลังงานไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้น 4 % ที่มุม Tx1 เท่ากับ 60° และมุม Tx2 เท่ากับ -60° ในขณะที่ประสิทธิภาพเพิ่ม 16% ที่มุม Tx1 เท่ากับ -70° และมุม Tx2 เท่ากับ 40° โดยพิจารณาจากจุดที่ดีที่สุด

6. อภิปรายผลการวิจัย

การทดลองที่ 1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบวางตำแหน่งขดตัวนำในแนวตรง การใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากการคล้องสนามแม่เหล็กด้านขดรับกำลังงานเพิ่มขึ้น ตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด เมื่อขด Tx1 และ Tx2 ห่างจากขดรับกำลังงาน Rx ด้านละ 23 cm ตำแหน่งนี้คือพีแดนซ์ของระบบและแหล่งจ่ายมีความสอดคล้องกัน เนื่องจากความเหนี่ยวนำร่วมมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของระบบโดยตรง ในขณะที่ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง Tx1 ห่างจากขด Rx 18 cm และ Tx2 ห่างจากขด Rx 17 cm

การทดลองที่ 2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขด วางในแนวเชิงมุม กรณีให้กระแสไหลผ่านขดส่งกำลังงานมีทิศทางเดียวกัน กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าสูงสุด เมื่อขด Tx1 อยู่ที่มุม 0° และ Tx2 อยู่ที่มุม 180° ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กเสริมกันมากที่สุด



สอดคล้องกับการทดลองที่ 1 ในขณะที่ประสิทธิภาพสูงสุดที่ตำแหน่งขด Tx1 อยู่ที่มุม 40° และ Tx2 อยู่ที่มุม -150°

กรณีให้กระแสไหลผ่านขดส่งกำลังงาน ส่วนทางกันกำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าสูงสุด เมื่อตำแหน่งขด Tx1 อยู่ที่มุม 60° และขด Tx2 อยู่ที่มุม -60° ที่ตำแหน่งนี้สนามแม่เหล็กระหว่างขดส่งกำลังงานมีทิศทางเสริมกัน และสามารถคล้องผ่านขดรับกำลังงานได้ดีที่สุด หรืออาจพิจารณาได้ว่าอิมพีแดนซ์ของระบบกับแหล่งจ่ายมีความสมดุลกัน ในขณะที่ประสิทธิภาพสูงสุดที่ตำแหน่งขด Tx1 อยู่ที่มุม -40° และ Tx2 อยู่ที่มุม 40°

การทดลองที่ 3 การทดลองปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ความเหนี่ยวนำร่วมเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างและตำแหน่งการจัดวางตัวนำ ผลทำให้ความถี่รีโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงตาม ดังนั้นเมื่อระยะห่างระหว่างตัวนำ หรือตำแหน่งการจัดวางเปลี่ยนแปลงไปการปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้นได้

ถึงแม้ว่ากำลังไฟฟ้าขาออกสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้สูงขึ้น อีกด้านหนึ่งทำให้ความเสียหายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ได้ง่ายเช่นกัน การเพิ่มพิคกิ้งกำลังไฟฟ้าขาออกโดยการเพิ่มจำนวนขดส่งกำลังงานจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนา วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

7. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จำนวนขด ทิศทางการไหลของกระแส และตำแหน่งการจัดวางขดส่งกำลังงาน รวมถึงการเลื่อนระยะห่างระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงาน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำร่วม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำร่วมดังกล่าวทำให้กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพของของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายเปลี่ยนแปลงตามโดยพิจารณาได้จากกราฟผลการทดลอง

การเพิ่มขดส่งกำลังงาน 2 ขด ที่ระยะห่าง และตำแหน่งการจัดวางที่เหมาะสม สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้

การปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ตามการเปลี่ยนแปลงของระยะห่าง ตำแหน่งการจัดวางตัวนำ ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น

ปริมาณสนามแม่เหล็กจากการทดลองควรพิจารณาประกอบกับค่ามาตรฐานตาม IEE Std.C96.1-2005 และ ICNIRP [3] ซึ่งได้แสดงค่าจำกัดระหว่างปริมาณสนามแม่เหล็กและความถี่ใช้งาน พิจารณาจากค่าที่ได้จากการจำลองแล้วพบว่าไม่เกินค่ามาตรฐานตามมาตรฐานดังกล่าว

การวัดค่าแรงดันและกระแสภายในวงจรจำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติเครื่องวัดเพื่อแน่ใจว่าสามารถวัดค่าในย่านความถี่ใช้งานได้ อย่างไรก็ตามควรระวังเรื่องการต่ออิมพีแดนซ์เข้าไปในวงจรเนื่องจากทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลงได้ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องของผลการทดสอบ

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอุดหนุนการวิจัย งบประมาณประจำปี 2558 และโครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานตีพิมพ์งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่สังคม (HRS) ปี 2558 จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hui, S.Y.R., Zhong, W., and Lee, C.K. (2014). A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer. *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 29(9), pp. 4500-4511.
- [2] Beh, T.C., Imura, T., Kato M., and Y. Hori. (2010). *Basic Study of Improving Efficiency of Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling Based on Impedance Matching. Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium*, 2011-2016.
- [3] Zhong, W., Lee C.K., and Hui, S.Y.R.(2013). *General Analysis on the Use of Tesla's Resonators in Domino Forms for Wireless Power Transfer. IEEE Trans. Ind. Electron*, vol.60(1).
- [4] Yoon, J.I. and Ling, H.(2011). *Investigation of near-field wireless power transfer under multiple transmitters. IEEE Antennas Wireless Propagation Lett*, pp. 662-665.
- [5] Lee, K. and Cho, D.(2013). *Diversity analysis of multiple transmitters in wireless power transfer system. IEEE Trans. Magn*, vol. 49(6), pp. 2946-2952.
- [6] Hatanaka, K., Sato, F., Matsuki, H., Kikuchi, S., Murakami, J., Kawase, M. and Satoh, T.(2002). *Power transmission of a desk with a cord-free power supply. IEEE Trans. Magn*, vol. 38(5), pp.3329-331.
- [7] Robert L. Boy lestad. (2003). *Introductory circuit analysis 10th ed.* New Jersey, USA: Peason Education, Inc., ch.21, pp.935-968.
- [8] Joy, R., Dalal, A., and Kumar, P.(2014). *Accurate Computation of Mutual Inductance of Two Air*



Core Squar Coils with Lateral and Angular Misalignments in a Flat Planar Surface. IEEE Trans. Magn, vol. 50(1).

- [9] Raju, S., Wu, R., Chan, M., and Yue, C.P. (2014) *Modeling of mutual coupling between planar inductors in wireless power applications. IEEE Trans. Power Electron*, vol. 29(1), pp. 481–490.
- [10] Zhang, Y., Zhao, Z., and Chen, K. (2014). *Frequency-Splitting Analysis of Four-Coil Resonant Wireless Power Transfer. IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 50(4), pp. 2436-2445.